

ANALISIS PERFORMANSI *ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (OFDMA)* SISTEM *FREE SPACE OPTIC (FSO)* DALAM KONDISI CUACA CERAH MENURUT STANDAR ITU-R P.1817

Juma'inah¹, Erfan Achmad Dahlan², Onny Setyawati²

¹Mahasiswa Teknik Elektro Univ. Brawijaya

²Dosen Teknik Elektro Univ. Brawijaya

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: juma_inah@gmail.com

Abstract—Free space optic (FSO) uses light propagating in free space to transmit data between two points in line of sight (LOS) condition. This research evaluated the application of *Orthogonal Division Multiple Acces (OFDMA)* for FSO system in the clear air condition which was effected by scintillation due to atmospheric turbulence. *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* modulation for range of 1- 5 km was evaluated. The simulation and analysis showed that the range of optical transmitter and receiver was inversely proportional to the link margin, the received power, the SNR and the system capacity, however it was proportional to the value of BER. The application of OFDMA on FSO system showed a good performance with BER of 10^{-8} (less the maximum BER allowed for data communication).

Index Terms— FSO, OFDMA, for transmitter to receiver range, BER.

Abstrak—*Free space optic (FSO)* merupakan sebuah teknologi telekomunikasi yang menggunakan propagasi cahaya dalam *free space* untuk mentransmisikan data antara dua titik dalam kondisi *line of sight (LOS)*. Dalam skripsi ini dianalisis tentang penerapan *Orthogonal Division Multiple Acces (OFDMA)* pada sistem FSO yang dihitung dalam kondisi cuaca cerah yang tetap terinduksi sintilasi akibat turbulensi atmosfer dengan menggunakan teknik modulasi *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* pada jarak 1 km sampai 5 km. Hasil simulasi dan analisis menyatakan bahwa jarak pemancar dan penerima berbanding terbalik dengan *link margin*, daya terima, SNR, dan kapasitas sistem, akan tetapi berbanding lurus dengan BER sistem. Penerapan teknik OFDMA pada FSO yang dianalisis sudah memiliki performansi yang baik. Hal ini dapat dilihat bahwa pada jarak 5 km sistem mempunyai BER 10^{-13} (lebih kecil dari nilai BER maksimal yang diizinkan pada sistem untuk informasi data).

Kata Kunci— FSO, OFDMA, untuk jarak pemancar dan penerima, BER.

I. PENDAHULUAN

Teknik transmisi data mengalami perkembangan yang dimulai dengan penggunaan jaringan kabel tembaga sebagai media transmisi pada sistem telepon rumah. Namun karena jaringan tembaga adalah jaringan tetap (*fixed line*) yang memiliki *bandwidth* sempit, maka selanjutnya dikembangkan suatu inovasi baru dengan transmisi nirkabel untuk koneksi antar jaringan menggunakan frekuensi radio. Akan tetapi sistem komunikasi ini masih memiliki beberapa kendala yaitu masalah perizinan frekuensi yang digunakan.

Sistem *free space optic (FSO)* merupakan salah satu alternatif untuk mengatasi masalah ini. Sistem ini memanfaatkan frekuensi cahaya sebagai media transmisi. Panjang gelombang yang digunakan adalah daerah *infrared* sehingga dapat menyesuaikan dengan perangkat optik yang digunakan untuk jaringan serat. Teknologi ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya *bandwidth* yang sangat besar sehingga dapat memenuhi kebutuhan *data rate* yang tinggi dan tidak memerlukan perizinan penggunaan frekuensi [1]. Akan tetapi, propagasi gelombang optik melalui udara mengalami fluktuasi amplitudo dan fasa karena turbulensi atmosfer yang juga dikenal dengan *scintillation* (sintilasi) dan tetap ada dalam kondisi cuaca cerah [2]. Turbulensi atmosfer dapat menyebabkan sintilasi yang dapat mengakibatkan peningkatan *bit error rate* [3].

Pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan OFDM pada FSO dengan menggunakan perangkat FPGA dapat dihasilkan SER rata-rata 10^{-6} pada jarak 1,87 km dan kecepatan 300 Mbps [4]. Selain itu juga telah dilakukan penerapan teknik *multiple access* yaitu CDMA pada FSO [5] dan MC-CDMA pada FSO yang dievaluasi dalam kondisi turbulensi kuat yang dimodelkan dalam *Gamma-Gamma PDF* [6].

Pengembangan dalam skripsi ini yaitu pada penggunaan teknik OFDMA pada sistem FSO dalam kondisi cuaca cerah menurut standar ITU-R P.1817 dengan modulasi QPSK pada intensitas *fading* sesuai dengan standar LTE release 8 dan penggunaan laser dengan panjang gelombang 1550 nm. Kajian dalam skripsi ini ditekankan pada beberapa parameter performansi sistem FSO dengan penerapan teknik OFDMA yang meliputi, nilai *link margin*, daya di penerima optik, *signal to noise ratio (SNR)*, kapasitas sistem, serta *bit error rate (BER)* pada jarak 1 km sampai 5 km.

II. *FREE SPACE OPTIC (FSO)*

Free space optic merupakan jaringan nirkabel *line off sight (LOS)* yang menggunakan *beam* cahaya yang mengacu pada laser pada jaringan optik. FSO dapat bekerja pada jarak ratusan meter sampai beberapa kilo meter [3]. Spesifikasi FSO yang digunakan pada perhitungan skripsi ini ditunjukkan pada Tabel 1[4].

Tabel 1. Spesifikasi sistem FSO

Parameter	Keterangan	Nilai
λ	Panjang gelombang	1550 nm
Pt	Daya pancar rata-rata	80 mW = 19,0309 dBm
d_2	Receive aperture diameter	20 cm
θ	Sudut divergensi	2 mrad
T	Temperatur	-40°C s/d 60°C
R_L	Resistansi beban	50 Ω
$\mathcal{R} = \eta q/h\nu$	Responsivitas InGaAs APD	9 A/W

(Sumber: Ayman Mustafa, 2012)

III. SPESIFIKASI REDAMAN DALAM FSO

Kekurangan sistem FSO adalah tidak kebal terhadap efek atmosfer seperti redaman dan *scintillation* yang dapat mengurangi kemampuan jalur. Beberapa spesifikasi redaman yang terjadi pada FSO adalah berikut ini.

3.1. Konsep Redaman Optik

Redaman optik terjadi pada peralatan optik pemancar maupun penerima mengakibatkan pelemahan sinyal [7].

3.2. Konsep Redaman Geometrik

Redaman geometrik disebabkan oleh penyimpangan *beam* optik transmisi antara pemancar dan penerima, dengan persamaan [8].

$$L_{geo}(dB) = 10 \log \left[\frac{d_2}{d_1 + 100L\theta} \right]^2 \quad (1)$$

Dengan L_{geo} merupakan Redaman geometrik (dB), d_1 dan d_2 adalah Diameter optik pemancar dan penerima (cm), L adalah Jarak antara pengirim dan penerima (km), dan θ adalah Sudut divergensi (mrad)

3.3. Redaman Pointing

Terjadi karena pemancar tidak terarahkan secara akurat ke penerima [9].

3.4. Redaman Akibat Sintilasi

Atmosfer yang terinduksi turbulensi karena sintilasi akan menyebabkan fluktuasi pada sinyal terima. Nilai variansi sintilasi ini dapat ditunjukkan sebagai berikut [10].

$$\sigma_x^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

σ_x^2 merupakan variansi sintilasi (dB²), C_n^2 adalah parameter struktur indeks bias (m^{-2/3}), $k(\frac{2\pi}{\lambda})$ adalah gelombang (rad/m), dan L adalah jarak pemancar dan penerima (m). Dan nilai redaman akibat sintilasi adalah sebesar

$$L_{sint} = 2 \times \sigma_x \quad (3)$$

Pada umumnya pada gelombang optik, nilai C_n^2 berkisar antara 10^{-16} m^{-2/3} dan 10^{-13} m^{-2/3} yaitu tergantung dari rendah sampai tingginya turbulensi atmosfer yang terjadi. Nilai maksimum C_n^2 pada turbulensi yang kuat

adalah 2×10^{-13} m^{-2/3} [6]. Pada kondisi turbulensi kuat probabilitas fluktuasi indeks bias dimodelkan dalam *Gamma-Gamma* PDF sebagai berikut [5]:

$$p_x(x) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}x) \quad (4)$$

Dimana $x > 0$ dan $\Gamma(.)$ merupakan fungsi *Gamma*, $K_n(.)$ adalah modifikasi fungsi Bessel dengan order $\alpha - \beta$, serta α dan β masing-masing adalah nilai efektif redaman dan konstelasi pergeseran fasa yang dapat dihitung dengan

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0,49\sigma_x^2}{(1+0,18d^2+0,56\sigma_x^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0,51\sigma_x^2(1+0,69\sigma_x^{12/5})^{-5/6}}{(1+0,9d^2+0,62d^2\sigma_x^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (6)$$

3.5. Konsep Redaman Atmosfer dalam Clear Air menurut ITU-R P.1817

Nilai redaman atmosfer pada kondisi cuaca cerah L_{clear_air} (dB) ditunjukkan dalam persamaan berikut

$$L_{clear_air} = a_{clear_air} * L \quad (7)$$

a_{clear_air} adalah parameter atenuasi yang dapat dilihat pada tabel.5 (dB/km), dan L dalam satuan km.

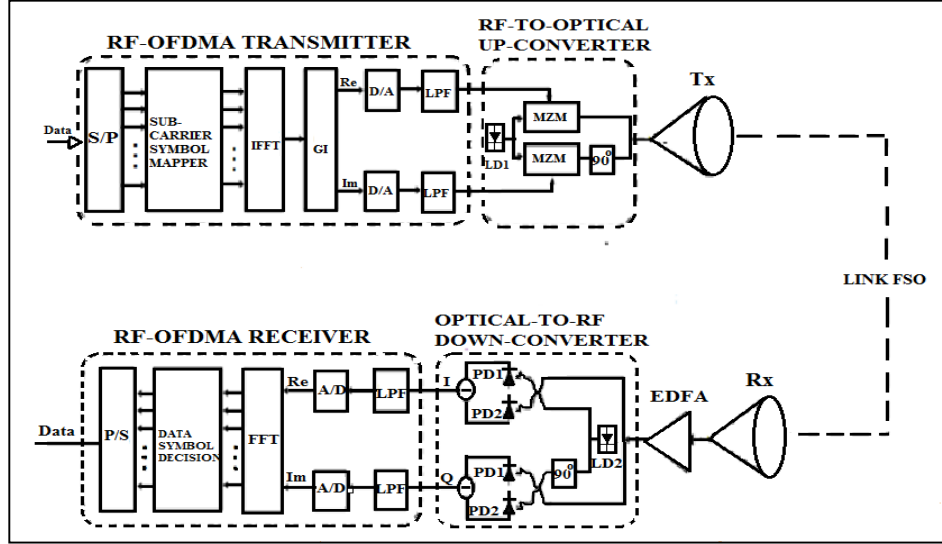
Berdasarkan ITU-R P.1814 spesifikasi dari redaman atmosfer dapat ditulis dengan hasil penjumlahan dari redaman pada cuaca cerah karena molekul gas dan redaman karena kondisi cuaca tertentu.

Visibilitas didefinisikan sebagai jarak sebuah obyek pada saat kekontrasan gambar berkurang 2% dari nilai aslinya yang dihitung pada panjang gelombang 1550 nm dengan mempertimbangkan intensitas maksimum spektrum matahari. Tetapan nilai redaman atmosfer berdasarkan jarak visibilitas yang terjadi pada cuaca cerah adalah 20 km ($a=0,54$ dB/km), 23 km ($a=0,47$ dB/km) dan 50 km ($a=0,19$ dB/km) [11].

IV. ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION ACCESS (OFDMA) PADA FSO

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) merupakan teknik *multiple access* yang menggunakan beberapa frekuensi (*multicarrier*) yang saling tegak lurus (*orthogonal*). OFDMA mengirimkan beberapa pesan pada satu kanal transmisi tanpa terjadi *inter-carrier interference* (ICI) dan *inter-symbol interference* (ISI) dikarenakan adanya proses penambahan *cyclic prefix* (CP) pada simbol [12].

Blok diagram dasar dari suatu pemancar dan penerima OFDMA pada sistem FSO ditunjukkan dalam **Gambar 1**. Konsep diagram sistem FSO-OFDMA terdiri dari lima blok fungsi dasar yaitu RF-OFDMA transmitter, RF-to-optical (RTO) up-converter, FSO link, optical-to-RF (OTR) down-converter, and RF OFDM receiver.



Gambar 1. Konfigurasi sistem FSO-OFDMA
(Digambar ulang setelah: William Sieh & Ivan Djordjevic, 2010)

Kata RF menunjukkan sinyal elektrik untuk membedakan dengan domain optik. Dalam pemancar RF-OFDMA, sinyal input dikonversi dari serial menjadi paralel. Simbol informasi ini kemudian dipetakan kedalam sinyal kompleks. Sinyal masuk ke blok IFFT dan terjadi penambahan *cyclic prefix*. Sinyal digital selanjutnya diubah ke analog menggunakan DAC dan difilter oleh LPF. Pada RTO *up-converter* mengubah sinyal *baseband* menjadi sinyal optik untuk selanjutnya ditransmisikan. Pada sisi penerima terjadi proses kebalikan dari pemancar FSO-OFDMA [2]. Penggunaan EDFA pada sisi penerima bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas penerima optik.

1. Link Margin

Nilai *link margin* sistem FSO dalam cuaca cerah dapat dihitung dengan persamaan [10]:

$$M_{link} = P_T - S_r - L_{sistem} - L_{Geo} - L_{clear_air} - L_x \quad (8)$$

Dengan P_T merupakan daya transmisi dalam dBm, S_r adalah sensitivitas penerima dan L_{sistem} terdiri dari rugi optik dan rugi pointing.

2. Daya Terima (Received Power)

Persamaan untuk menghitung daya terima [5] adalah sebagai berikut:

$$P_r = P_t L_{atm} L_{\alpha} X + n_{FSO}(t) \quad (9)$$

L_{atm} merupakan rugi-rugi atmosfer yang meliputi rugi pada cuaca cerah (L_{clear_air}) dan rugi sintilasi (L_{sint}), sedangkan L_{α} meliputi rugi geometrik (L_{Geo}), dan rugi-rugi sistem (L_{sistem}), X adalah Variasi *fading* sinyal (dari persamaan 4), $n_{FSO}(t)$ adalah karakteristik AWGN, Serta P_t dan P_r dihitung dalam mW.

3. Signal to Noise Ratio (SNR)

Noise pada sistem optik nirkabel dapat dibedakan menjadi dua bagian besar yaitu *shot noise*

dan *thermal noise*. Nilai SNR pada sistem FSO [13] adalah sebagai berikut:

$$SNR_{FSO} = \frac{(\Re P_R)^2}{2q i_s B + 4kTB/R_L} \quad (10)$$

\Re adalah Responsivitas penerima pada $\lambda=1550$ nm, q adalah Besar muatan elektron (C), B adalah Bandwith (Hz), i_s merupakan arus sinyal yang diterima (mA), k adalah konstanta Boltzman (J/K), T adalah temperatur (K) dan R_L adalah resistansi beban (Ω). Sedangkan, besarnya nilai SNR efektif sistem yang menggunakan *air interface* OFDMA [14] diperoleh dari persamaan (11) berikut.

$$SNR_{FSO-OFDMA} = (1 - \alpha_{cp}) SNR_{FSO} \quad (11)$$

4. Kapasitas Sistem

Kapasitas sistem yang dihitung pada skripsi ini adalah pada kanal AWGN. Pada kanal AWGN Besarnya kapasitas sistem (C) dalam satuan bps/Hz dapat dihitung dengan persamaan berikut [15].

$$C = \log_2(1 + SNR_{FSO-OFDMA}) \quad (12)$$

5. Bit Error Rate (BER)

BER (*bit error rate*) merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. Nilai BER sistem FSO dengan tipe modulasi QPSK [16] dapat ditulis sebagai:

$$BER_{sistem} = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (13)$$

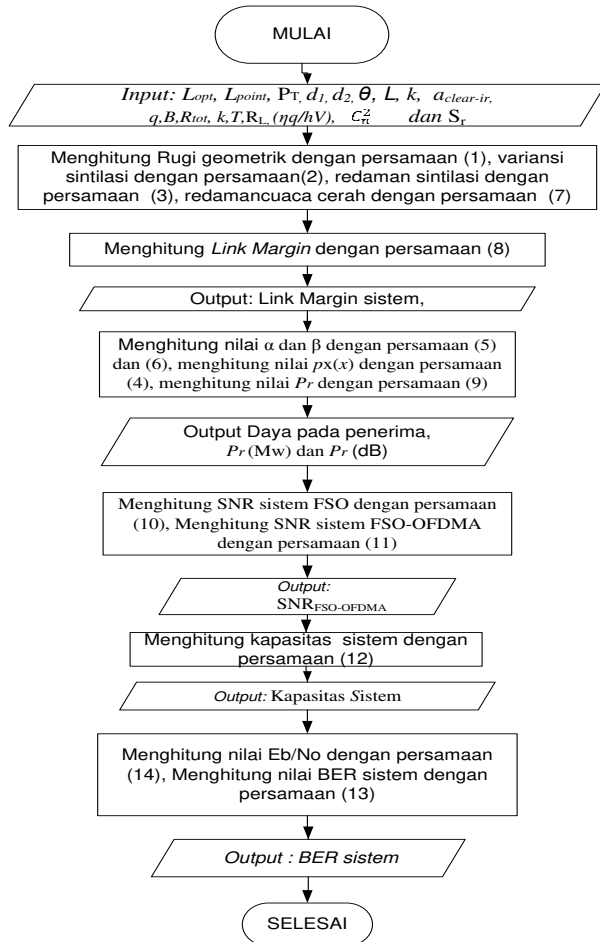
Dengan E_b/N_0 adalah *Energy Bit-to-Noise Ratio* yang dinyatakan sebagai :

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR_{FSO-OFDMA} - 10 \log \frac{B}{R_{tot}} \quad (14)$$

Dengan B adalah *Bandwith* (Hz) dan R_{tot} adalah laju data dalam bps.

V. HASIL DAN ANALISA

Skripsi ini menggunakan kajian yang bersifat analisis mengenai studi pada performansi *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) pada FSO. Data yang diperlukan terdiri dari data sekunder yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, internet, dan forum-forum resmi FSO dan OFDMA yang mencakup konsep dasar FSO, parameter teknologi FSO, konsep dasar OFDMA, parameter OFDMA pada jaringan LTE release 8, serta parameter performansi OFDMA pada FSO. Langkah-langkah perhitungan untuk mendapatkan performansi-performansi yang diinginkan yang ditunjukkan pada **Gambar 5** dengan asumsi penerima optik yang digunakan dalam sistem adalah InGaAs-APD dengan penguatan EDFA ideal [17].



Gambar 5. Diagram alir perhitungan performansi sistem OFDMA pada *free space optic* (FSO).

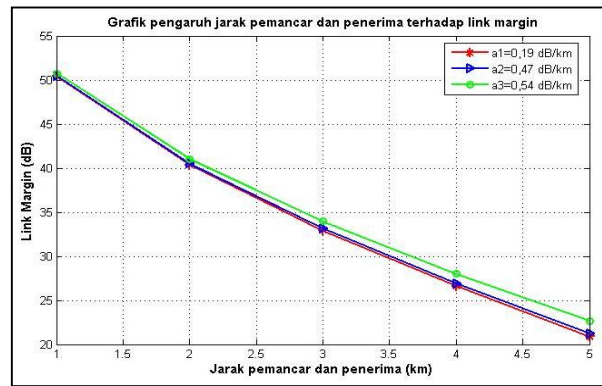
Analisis performansi OFDMA dilakukan berdasarkan pada teori dan persamaan yang telah dijelaskan pada Bab II yang meliputi daya pada penerima optik, *link margin*, SNR, kapasitas sistem dan BER sistem dengan menggunakan teknik modulasi QPSK. Variabel bebas yang digunakan dalam skripsi ini adalah jarak antara pemancar dan penerima optik yang dihitung mulai 0,5 sampai 5 km dengan dua indeks *fading* 1 akibat fluktuasi sintilasi yang berbeda yaitu dengan nilai 0,5 dan 1,0.

Parameter OFDMA yang digunakan pada sistem menggunakan standar LTE release 8 pada kanal

bandwidth 20 Mhz dengan jumlah subcarrier 1200 dan 2048 simbol FFT. OFDMA pada standar ini pada dasarnya memiliki *bandwidth* transmisi yang lebih kecil dari *bandwidth* kanal, karena disediakan sebesar 10 % untuk Cyclic Prefic (CP) pada kedua sisi. CP normal yang digunakan pada OFDMA LTE dengan kanal 20 MHz adalah sebesar 7,14% [18]. Untuk spesifikasi FSO yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 1**.

5.1 Analisis Link Margin Sistem

Nilai *link margin* sistem dipengaruhi oleh rugi-rugi yang terjadi saat transmisi sinyal dan turbulensi atmosfer. Dari hasil perhitungan menggunakan rumus (9) maka untuk jarak 1 sampai 5 km dan visibilitas 20 km, 23 km serta 50 km dan dengan mengasumsikan rugi-rugi pointing dan rugi-rugi optik masing-masing 1 dB diperoleh hasil seperti **Gambar 6** berikut ini.



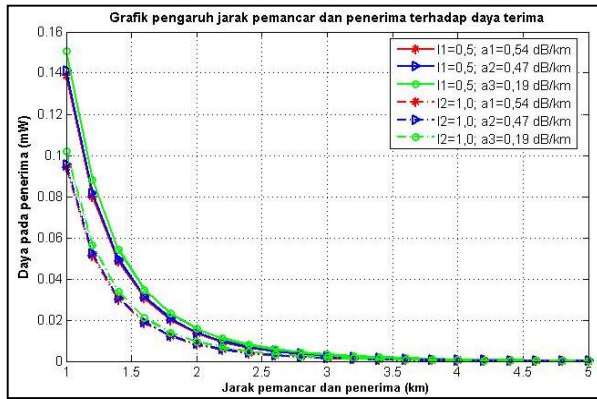
Gambar 6. Grafik pengaruh jarak terhadap link margin untuk beberapa kondisi visibilitas pada cuaca cerah

Gambar 6 merupakan grafik hubungan antara jarak pemancar dan penerima terhadap nilai *link margin* sistem. Seiring dengan pertambahan jarak, maka akan terjadi penurunan link margin untuk transmisi pada visibilitas yang sama. Sedangkan untuk jarak yang sama, semakin jauh visibilitas maka nilai link margin akan semakin besar.

Redaman atmosfer yang terjadi semakin kecil pada visibilitas yang semakin jauh, karena penyerapan atmosfer semakin kecil pada cuaca yang semakin cerah. Selain rugi-rugi geometrik dan rugi-rugi karena sintilasi akan semakin bertambah seiring bertambahnya jarak. Dengan jarak yang jauh, maka penyimpangan *beam* optik akan semakin lebar sehingga cahaya yang ditangkap oleh lensa penerima semakin sedikit, dan menurunkan nilai *link margin*.

5.2 Analisis Daya Terima Sistem

Pada proses transmisi FSO dalam kondisi cuaca cerah juga dipengaruhi oleh turbulensi atmosfer akibat sintilasi. Daya terima sistem yang sudah dipengaruhi rugi-rugi *link* dan turbulensi atmosfer dapat dihitung menggunakan persamaan (9) dengan Karakteristik AWGN yang terjadi pada link *free space* ($n_{FSO}(t)$) adalah *background radiation noise*, akan tetapi *noise* ini akan dihilangkan pada sisi penerima [4]. Besarnya daya yang diterima detektor optik ditunjukkan pada **Gambar 7**.



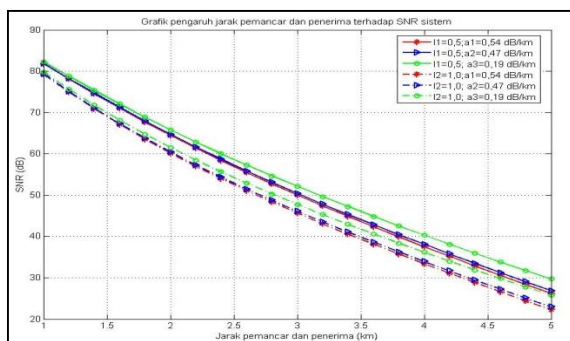
Gambar 7. Grafik pengaruh jarak terhadap Daya terima sistem untuk beberapa kondisi visibilitas dan indeks *fading* pada cuaca cerah

Pada **Gambar 7** terlihat bahwa untuk transmisi pada visibilitas yang sama, semakin jauh jarak antara pemancar dan penerima, maka semakin kecil daya yang sampai pada *receiver*. Nilai daya terima sistem FSO dipengaruhi oleh rugi-rugi yang terjadi pada sistem FSO. Rugi-rugi yang dihitung meliputi rugi-rugi sistem, rugi geometrik, rugi atmosfer serta rugi sintilasi. Rugi-rugi geometrik, rugi atmosfer dan rugi sintilasi berbanding lurus dengan jarak pemancar dan penerima optik, sehingga untuk jarak yang semakin jauh maka rugi-rugi yang terjadi akibat penyimpangan beam, penyerapan *aerosol* dan *fading* sinyal akibat sintilasi akan semakin besar pula. Hal ini akan menyebabkan sinyal yang diterima akan semakin lemah.

5.3 Analisis Signal to Noise Ratio (SNR) Sistem

Signal to Noise Ratio (SNR) dihitung pada sisi penerima optik dengan sumber *noise* utama yang dimodelkan dalam AWGN adalah *noise* pada proses deteksi yang disebabkan oleh *shot noise* $\langle i_{SN}^2 \rangle_{APD}$, dan *thermal noise* atau *Johnson noise* $\langle i_{JN}^2 \rangle$. Nilai SNR

Gambar 8 sebagai berikut.



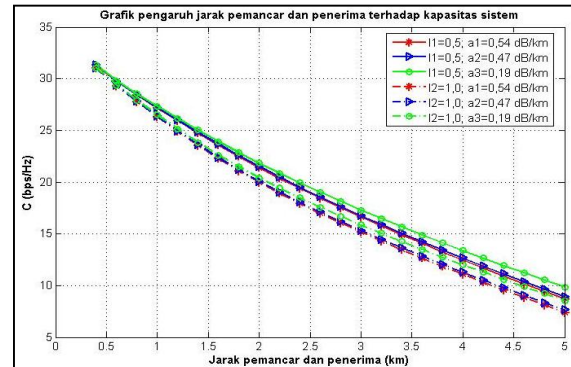
Gambar 8. Grafik pengaruh jarak terhadap SNR sistem untuk beberapa kondisi visibilitas dan indeks *fading* pada cuaca cerah

Gambar 8 memperlihatkan bahwa untuk transmisi dengan intensitas sinyal yang sama, semakin jauh jarak pemancar dan penerima, nilai SNR sistem akan semakin kecil. Hal ini karena daya yang diterima penerima optik semakin kecil untuk jarak pemancar dan penerima yang jauh. Dengan daya terima yang kecil maka nilai arus terima juga akan kecil sehingga menyebabkan nilai SNR sistem akan kecil pula. Secara keseluruhan nilai SNR sistem untuk visibilitas 50 km

lebih besar daripada visibilitas 20 km dan 23 km. Hal ini sesuai dengan semakin besarnya koefisien redaman atmosfer ketika visibilitas semakin berkurang. Pada jarak dan visibilitas yang sama, nilai SNR sistem untuk intensitas sinyal 1,0 lebih kecil dibandingkan dengan sistem dengan intensitas sinyal 1,0. Hal ini karena semakin tinggi intensitas sinyal maka nilai probabilitas sinyal terima yang dimodelkan dalam *Gamma-Gamma* PDF akan semakin kecil.

5.4. Analisis Kapasitas Sistem

Nilai kapasitas sistem ditunjukkan dalam **Gambar 9** berikut.

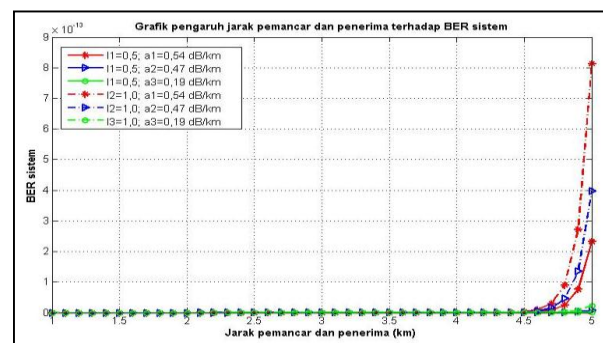


Gambar 9. Grafik pengaruh jarak terhadap kapasitas sistem untuk beberapa kondisi visibilitas dan indeks *fading* pada cuaca cerah

Pada **Gambar 9** dapat dilihat bahwa nilai visibilitas dan intensitas sinyal yang sama, semakin jauh jarak pemancar dan penerima, maka nilai kapasitas sistem akan semakin kecil. Hal ini karena nilai SNR yang semakin kecil seiring dengan bertambahnya jarak dan berkurangnya visibilitas. Dengan jarak yang bertambah maka redaman atmosfer akibat penyimpangan beam optik dan fading akibat sintilasi akan bertambah pula. Nilai visibilitas berpengaruh pada koefisien redaman yang terjadi, dengan berkurangnya visibilitas akan menyebabkan bertambahnya redaman atmosfer akibat aerosol dan berkurangnya SNR sehingga akan mengurangi nilai kapasitas sistem.

5.5 Analisis BER sistem

Bit Error Rate (BER) merupakan perbandingan nilai bit salah dengan seluruh bit saat proses transmisi yang dihitung di sisi penerima. Analisis BER untuk jarak sampai 5 km ditunjukkan dalam **Gambar 10**.



Gambar 9. Grafik pengaruh jarak pemancar dan penerima terhadap BER sistem beberapa kondisi visibilitas dan indeks *fading* pada cuaca cerah

Berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai BER berbanding lurus dengan jarak pemancar ke penerima dan berbanding terbalik dengan visibilitas. Semakin jauh jarak pemancar dan penerima, maka nilai BER yang dihasilkan akan semakin besar, dan semakin jauh nilai visibilitas maka nilai BER akan semakin kecil karena nilai SNR yang terjadi semakin besar. Semakin besar SNR maka nilai E_b/N_0 akan semakin besar sehingga akan menyebabkan nilai BER sistem semakin kecil.

Untuk pengembangan skripsi ini dapat di analisis pengaruh OFDMA pada FSO pada kondisi cuaca yang bermacam-macam, seperti hujan, kabut maupun bersalju serta performansi teknologi FSO dengan aplikasi teknik modulasi yang berbeda, seperti M-PSK dan M-QAM dengan kecepatan yang lebih tinggi ($>24,52$ Mbps).

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perhitungan dan simulasi dapat disimpulkan sebagai berikut

1. Semakin jauh jarak pemancar dan penerima maka nilai link margin akan semakin kecil. Hal ini karena rugi-rugi yang terjadi seperti rugi geometrik akibat penyimpangan beam optik, rugi atmosfer akibat penyerapan aerosol, dan rugi sintilasi yang menyebabkan fluktuasi sinyal terima semakin besar seiring dengan bertambahnya jarak. Nilai link margin sistem terbesar adalah 50,7532 dB.
2. Besarnya daya terima sistem dipengaruhi oleh nilai visibilitas, intensitas sinyal, jarak pemancar dan penerima dan fluktuasi intensitas sinyal terima akibat sintilasi yang dimodelkan dalam fungsi distribusi probabilitas Gamma-Gamma. Daya terima terbesar yaitu saat $I = 0,5$ dengan visibilitas 50 km pada jarak 1 km yaitu sebesar 0,15046 mW atau -8.2258 dBm.
3. Besarnya intensitas sinyal sangat mempengaruhi nilai SNR sistem. Nilai SNR sistem tertinggi adalah sebesar 82.2749 dB dan nilai SNR sistem terendah adalah 22.2546 dB yang terjadi ketika jarak pemancar dan penerima 5 km dengan intensitas sinyal 1,0 pada visibilitas 20 km
4. Nilai kapasitas sistem sebanding dengan SNR sistem, semakin besar nilai SNR sistem, maka kapasitas sistem akan semakin besar sehingga transmisi bit per satuan bandwidth akan semakin cepat. Kapasitas sistem terbesar adalah sebesar 27.3311 bps/Hz yaitu pada $I = 0,5$ untuk jarak pemancar dan penerima sejauh 1 km pada visibilitas 50 km.
5. BER sistem dengan intensitas sinyal 0,5 lebih kecil dibandingkan untuk $I = 1,0$. Secara keseluruhan nilai BER sistem dibawah 10^{-8} BER dengan nilai BER sistem terbesar yaitu 8.1212×10^{-13} saat $I = 1,0$ pada visibilitas 20 km dengan jarak 5 km. BER sistem terbaik adalah 3.8264×10^{-39} yaitu untuk $I = 0,5$ pada jarak 5 km dan visibilitas 20 km.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Widyarena, Octiana., Gamantyo Hendrantoro, dan Achmad Mauludiyanto. 2012. *Kinerja Sistem Komunikasi FSO (Free Space Optics) Menggunakan Cell-site Diversity di Daerah*

- Tropis. JURNAL TEKNIK ITS Vol. 1, (Sept, 2012) ISSN: 2301-9271*
- [2]. Shieh, William & Ivan Djordjevic. 2010. *"OFDM for Optical Telecommunication"*. London: Elsevier Inc.
- [3]. Mehra, Monika. 2007. *FREE SPACE OPTICS : High bandwidth solution in network world*.
<http://www.rimtingg.com/coit2007/proceedings/pdfs/108.pdf>,
(diakses tanggal 2 november 2012)
- [4]. Mostafa, ayman. 2012. *Measurement and Modelling of a Free-Space Optical Link and In-Field OFDM Experiment*. Open Dissertations and Teses McMaster University, Paper 6800.
- [5]. Bekkali, Abdelmoula dkk. 2009. *Performance Analysis of SCM-FSO Link for Transmission of CDMA Signal under Gamma-Gamma Turbulent Channel*. In Proceedings of the IEEE Military
- [6]. Hassan, MD. Zoheb dkk. 2011. *Turbo-Coded MC-CDMA Communication Link over Strong Turbulence Fading Limited FSO Channel with Receiver Space Diversity*. International Scholarly Research Network ISRN Communication and Networking, Vol 2011, Article ID 701670.
- [7]. Haryadi, sigit & Martinius Hadi satria. 2004. *Wireless Optical Communication untuk Penggunaan Luar Ruangan*.
http://telecom.ee.itb.ac.id/~sigit/Wireless_Optical_Communication_Outdoor_SH.pdf. (diakses tanggal 2 november 2012)
- [8]. Willebrand, Heinz & Ghuman, Baksheesh S. 2002. *"Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks"*. Indiana 46240 USA. Sams Publishing.
- [9]. Hranilovic, Steve. 2005. *Wireless Optical Communication System*. Boston: Springer Science + Business Media, Inc.
- [10]. ITU-R P.1814, R.. 2007. *"Prediction Methods Required For the Design of Terrestrial Free-space Optical Links"*.
- [11]. ITU-R P.1817, R.. 2007. *"Propagation Data Required for the Design of Terrestrial Free-Space Optical links"*.
- [12]. Srikanth, Kumaran V., Manikandan C., Murugesapandian. 2007. *Orthogonal frequency division multiple access*. Anna University Press, Chennai, India.
- [13]. B. Y. Zhang, Y. Kim, Y. Park, and K. -D. Kim.2011. *"Performance Anlysis of Hybrid FSO/RF System"*, presented at the 2011 third International Conference Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Dalian, China IEEE, June 15-17.
- [14]. Hara, Shisuke, Ramjee Prasaad. 2003. *Multicarrier Technique for 4G mobile communications*. London : Artech House.
- [15]. Ergen, Mustafa. 2009. *Mobile Broadband Including WiMAX and LTE*. USA: Springer.
- [16]. Goldsmith, Andrea. 2005 . *Wireless Communication*. Cambridge University Press
- [17]. Dignonne, Michel J.F. 2001. *Rare-Earth-Doped Fiber Laser and Amplifier Second Edition, Revised and Expanded*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [18]. Khan, Farooq. 2009. *LTE for 4G Mobile Broadband*. New York: Cambridge University Press.